

Энергетика

УДК 62.524

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСПУЧИВАНИЯ КЕРАМЗИТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

С.Я. Галицков¹, А.И. Данилушкин², А.С. Фадеев¹

¹ Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

² Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

На основании принятых допущений разработана расчетная схема вращающейся печи для производства керамзита в виде четырехслойного цилиндра как объекта управления с распределенными параметрами. При моделировании использованы дифференциальные уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с учетом граничных условий, определяемых особенностями вспучивания. На примере печи СМ875Б типоразмера 2,5×40 м синтезирована структура объекта для решения задачи автоматизации процесса вспучивания керамзита по отношению к управляющему воздействию и возмущению (изменение влажности сырца) в виде структуры с сосредоточенными параметрами.

Ключевые слова: вращающаяся печь, керамзит, объект управления, теплопередача, объект с распределенными параметрами, уравнения движения, аппроксимация объекта управления, адекватность, математическое моделирование.

На предприятиях производства керамзита применяются вращающиеся печи, от качества управления которыми зависят параметры выпускаемого керамзита. Для рационального построения систем автоматического управления печью необходимо знание ее математической модели как объекта управления.

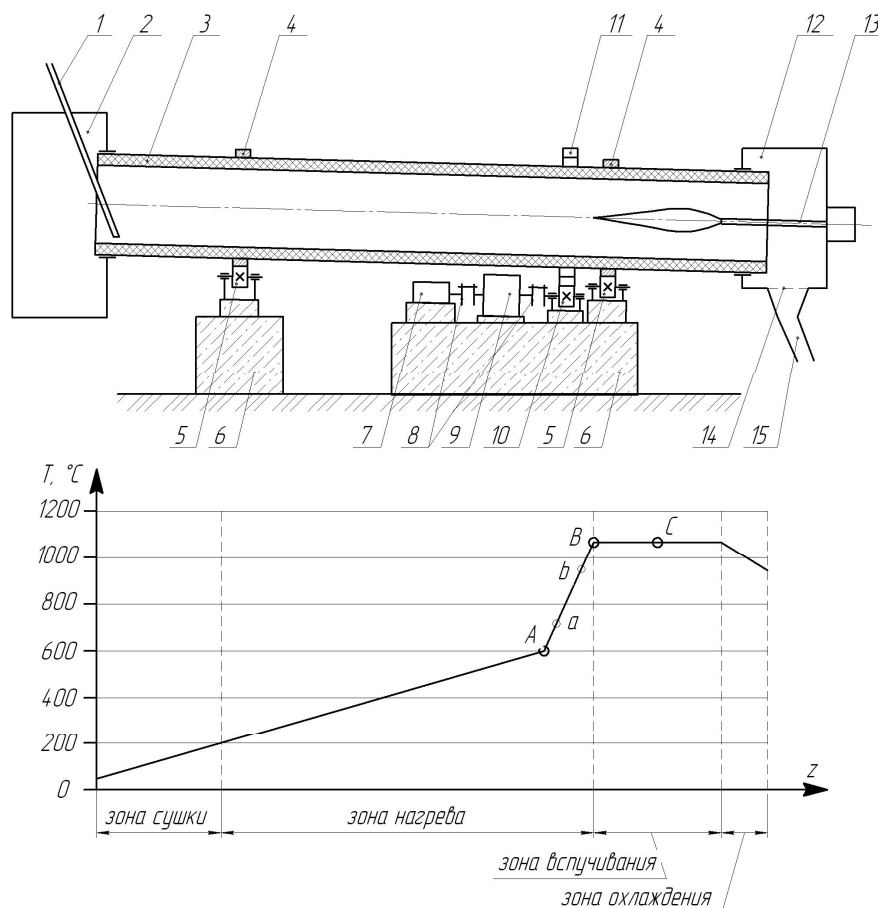
Конструкция вращающейся печи. Односекционная печь представляет собой [1] наклоненный на 3...5° к линии горизонта стальной барабан 3 (рис. 1, а), внутренняя поверхность которого футерована огнеупорным кирпичом. На корпусе печи имеются два бандажных кольца 4 (ими печь опирается на роликовые опоры 5, смонтированные на тумбах 6) и зубчатый венец 11, в зацепление с которым входит приводная шестерня 10, которая через редуктор 9 соединяется с электродвигателем 7. «Холодный» конец печи входит в загрузочную головку 2, а «горячий» – в разгрузочную откатную головку 12, в которой установлена горелка 13. Сырец керамзита, двигаясь вдоль оси печи, последовательно проходит четыре технологические зоны [2] тепловой обработки – сушку, нагрев, вспучивание и охлаждение (рис. 1, б).

Анализ кривой обжига позволяет осуществить ее линейно-кусочную аппрокси-

Станислав Яковлевич Галицков – д.т.н., профессор.
Александр Иванович Данилушкин – д.т.н., профессор.
Александр Сергеевич Фадеев – аспирант.

мацию [2]. В середине зоны вспучивания выделим точку C (рис. 1, б), которая определяет температуру вспучивания T_c . Конец зоны нагрева характеризуется градиентом $\frac{dT}{dz} = \frac{T_B - T_A}{z_{AB}}$, где T_A и T_B – температуры в точках A и B . Установлено [1], что один из основных показателей качества – насыпная плотность – зависит от характеристик кривой обжига: производной $\frac{dT}{dz}$ в конце зоны нагрева и температуры T_c .

Определение объекта управления, основные возмущения. Под *объектом управления* будем понимать совокупность тепловых и физико-химических процессов во вращающейся печи при вспучивании керамзита. Состояние объекта определяется значениями температуры керамзита в точках A , B , C и величиной $\frac{dT}{dz}$ на участке AB . Эти процессы можно регулировать [1, 2] изменениями режима работы горелки и величины скорости вращения печи, что определяет температурное поле в печи, протяженность технологических зон (сушка, нагрев, вспучивание и охлаждение). Считаем, что скорость вращения печи постоянна, тогда *управляющим воздействием* на объект является тепловая мощность Q горелки.



Р и с . 1. Конструкция вращающейся печи и кривая обжига керамзита

Возмущения, действующие на объект управления, можно разделить на две группы. Первая группа – это возмущения, действующие на горелку; основным здесь яв-

ляется изменение температуры воздуха, подаваемого в горелку. Возмущения второй группы – вариация параметров состава сырца и его влажности w ; изменение темпа загрузки материала в печь; нестабильность атмосферы среды, окружающей печь.

При моделировании объекта управления введем ряд *допущений*.

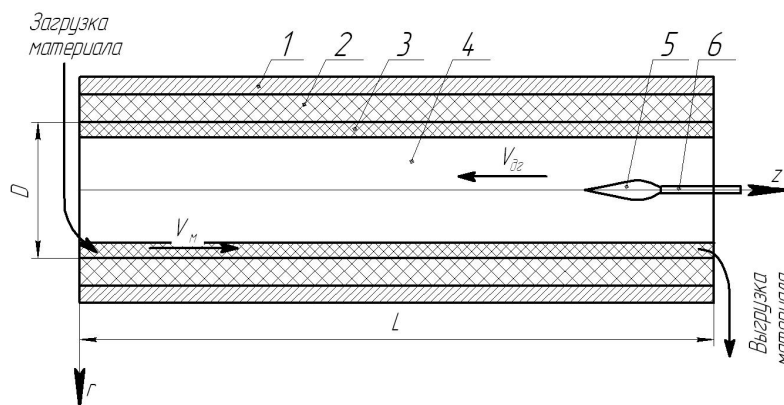
1. Считаем, что в горелке используется газообразное топливо, состав и температура которого неизменны. Геометрические параметры факела (длина и форма) настраиваются перед началом работы и затем не меняются.

2. Известно, что при движении дымовых газов вдоль оси печи к ним добавляются газы, выделяемые из сырца при его тепловой обработке. Как показывает практика [1], эти факторы меняют величину скорости дымовых газов не более чем на 5...10%. Поэтому допускаем, что скорость движения дымовых газов в осевом направлении постоянна по всей длине печи. Поток дымовых газов принимаем ламинарным, пренебрегаем движением газов в направлении, перпендикулярном оси печи.

3. Принимаем, что минералогический состав глины остается постоянным, что возможно при использовании сырья из одного карьера.

4. Принимая во внимание, что при вращении корпуса материал перекачивается по внутренней поверхности футеровки, допускаем, что сырец керамзита равномерно распределен по всей поверхности печи, а его температура и температура дымовых газов в сечении z постоянны.

Расчетная схема. На основании принятых допущений разработана расчетная схема печи (рис. 2) в виде отрезка трубы длиной L с внутренним диаметром футеровки D . Стенка состоит из трех слоев: корпус 1, футеровка 2, материал 3. Внутри цилиндра движутся дымовые газы со скоростью V_{dz} , материал перемещается навстречу им со скоростью V_m . Ось z цилиндрической системы координат совпадает с осью цилиндра, начало координат (точка O) расположено на холодном торце. Температуру печи в сечении z на расстоянии r от оси OZ в момент времени τ обозначим $T(z, r, \tau)$.



Р и с . 2. Расчетная схема вращающейся печи

Математическая модель тепловых процессов. Модель объекта управления представим совокупностью уравнений горелки [3], температурного поля и физико-химических процессов, происходящих в материале при его обжиге. Для получения модели четырехслойного цилиндра печи используем уравнение теплопроводности полого цилиндра с одной стенкой в цилиндрической системе координат [4]:

$$\frac{DT}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где T – температура стенки; a – коэффициент температуропроводности, $a = \lambda / (c_p \rho)$, здесь λ – коэффициент теплопроводности, c_p – удельная теплоемкость, ρ – плотность; $DT/\partial \tau$ – производная, связанная с движущейся материей,

$$\frac{DT(z, r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial r} + V_z \frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial z}, \quad (2)$$

здесь V_r , V_z – скорости движения дымовых газов и материала по координатам Or и Oz соответственно; принимая во внимание, что в расчетной схеме $V_r = 0$, имеем:

$$\frac{DT(z, r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial \tau} + V_z \frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial z}, \quad (3)$$

поэтому уравнение теплопроводности (1) принимает вид

$$\frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial \tau} + V_z \frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right); \quad (4)$$

применяя его к расчетной схеме печи (рис. 2) и учитывая 4-е допущение, получим систему из четырех дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{dg}(z, r, \tau)}{\partial \tau} = a_{dg}(z) \frac{\partial^2 T_{dg}(z, r, \tau)}{\partial z^2} - V_{dg} \frac{\partial T_{dg}(z, r, \tau)}{\partial z}, \\ \frac{\partial T_m(z, r, \tau)}{\partial \tau} = a_m(z) \frac{\partial^2 T_m(z, r, \tau)}{\partial z^2} - V_m \frac{\partial T_m(z, r, \tau)}{\partial z}, \\ \frac{\partial T_f(z, r, \tau)}{\partial \tau} = a_f \left(\frac{\partial^2 T_f(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial T_{st}(z, r, \tau)}{\partial \tau} = a_{st} \left(\frac{\partial^2 T_{st}(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{st}(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{st}(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right), \end{cases} \quad (5)$$

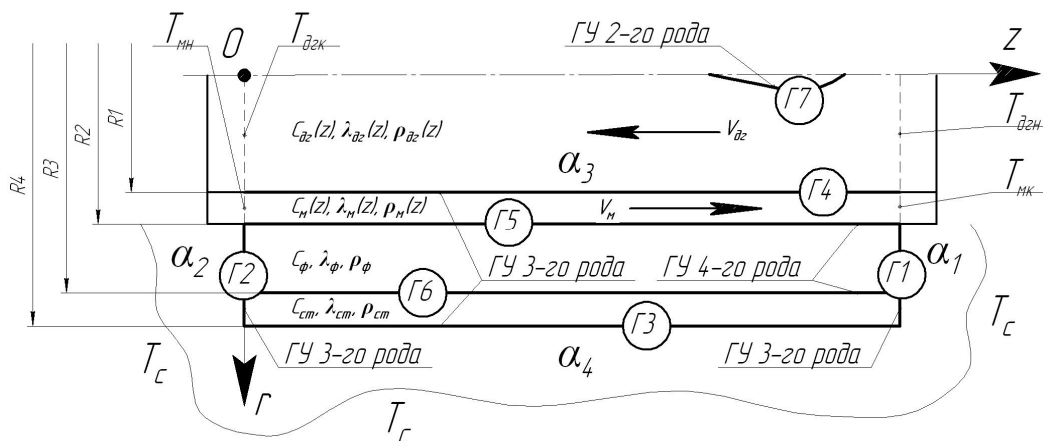
где первое уравнение описывает динамику температуры дымовых газов, второе – материала (керамзита), третье – футеровки и четвертое – корпуса; здесь T_{dg} , a_{dg} , V_{dg} ; T_m , a_m , V_m – температура, коэффициент теплопередачи и скорость движения дымовых газов и материала соответственно; T_f , a_f ; T_{st} , a_{st} – температура и коэффициент теплопередачи футеровки корпуса и стальной стенки печи соответственно. Система (5) нелинейна, т. к. коэффициенты дымовых газов и материала изменяют свои значения по длине печи: $a_{dg}(z)$, $a_m(z)$ [1, 2].

Уравнения системы (5) связаны между собой граничными условиями (ГУ), выбор которых произведен в соответствии с [4] следующим образом. Рассматриваемые в настоящей работе границы сред разделим (рис. 3) на три группы. К *первой* отнесем две границы, образуемые холодным ($\Gamma 1$) и горячим ($\Gamma 2$) торцами печи с внешней окружающей средой. Третья граница ($\Gamma 3$) образуется наружной цилиндрической поверхностью печи с окружающей средой. Четвертая граница $\Gamma 4$ – это граница дымовых газов с гранулами керамзита. Ко *второй группе* отнесем границы: $\Gamma 5$ – образуется между поверхностями материала и футеровки, $\Gamma 6$ – между поверхностью футеровки и внутренней стенкой корпуса. В *третьей группе* – одна граница $\Gamma 7$ между источником тепла и дымовыми газами. На границах первой группы происходит кон-

вективный теплообмен между поверхностями твердых тел, воздушной средой ($\Gamma 1$, $\Gamma 2$, $\Gamma 3$) и дымовыми газами ($\Gamma 4$). Считаем, что этот процесс происходит при постоянном потоке тепла и имеет квазистационарный режим. Поэтому принимаем, что на этих границах имеет место ГУ 3-го рода. Границы $\Gamma 1$ и $\Gamma 2$ имеют по два участка вдоль оси r – первый определяется отрезком $(R2 - R3)$, второй – $(R3 - R4)$. Границы второй группы соответствуют теплообмену соприкасающихся твердых тел при условии, что температура на границе этих тел одинакова. Поэтому здесь имеет место ГУ 4-го рода [4]. Будем считать, что объемная тепловая мощность $Q(\tau)$ горелки передается через поверхность факела. Тогда для седьмой границы можно принять ГУ 2-го рода. Исходя из этого граничные условия $T(z, r, \tau)$, приведенные к традиционному виду, в частных производных можно записать в виде системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_f \frac{\partial T(0, r, \tau)}{\partial z} = \alpha_1 (T_c(\tau) - T(0, r, \tau)), r \in [R2 \dots R3], \\ \lambda_{st} \frac{\partial T(0, r, \tau)}{\partial z} = \alpha_1 (T_c(\tau) - T(0, r, \tau)), r \in [R3 \dots R4], \\ \lambda_f \frac{\partial T(L, r, \tau)}{\partial z} = \alpha_2 (T_c(\tau) - T(L, r, \tau)), r \in [R2 \dots R3], \\ \lambda_{st} \frac{\partial T(L, r, \tau)}{\partial z} = \alpha_2 (T_c(\tau) - T(L, r, \tau)), r \in [R3 \dots R4], \\ \lambda_m \frac{\partial T(z, R1, \tau)}{\partial r} = \alpha_3 (T_c(z, R1 - 1, \tau) - T(z, R1, \tau)), z \in [0 \dots L], \\ \lambda_f \frac{\partial T(z, R2, \tau)}{\partial r} = \lambda_m \frac{\partial T(z, R2, \tau)}{\partial r}, z \in [0 \dots L], \\ \lambda_{st} \frac{\partial T(z, R3, \tau)}{\partial r} = \lambda_f \frac{\partial T(z, R3, \tau)}{\partial r}, z \in [0 \dots L], \\ \lambda_{st} \frac{\partial T(z, R4, \tau)}{\partial r} = \alpha_4 (T_c(z, R4 - 1, \tau) - T(z, R4, \tau)), z \in [0 \dots L], \\ Q(z_g, 0, \tau) = Q(\tau), r = 0, z \in [2 \dots 8m], \end{array} \right. \quad (6)$$

где $T_c(\tau)$ – температура окружающей среды.



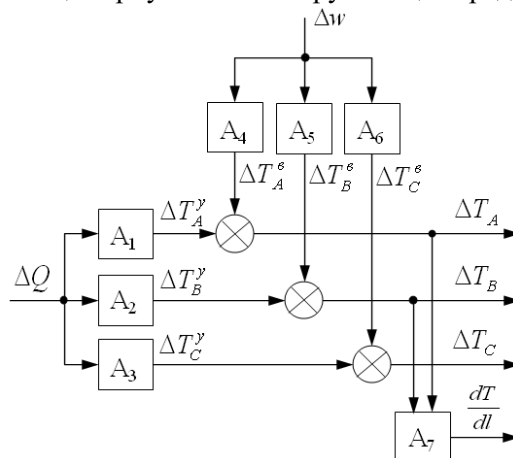
Р и с . 3. Схема граничных условий

На рис. 3: $R1, R2, R3, R4$ – радиусы границ раздела сред; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – коэффициенты теплоотдачи, $C_{дз}, C_m, C_f, C_{ст}$ – теплоемкости, $\lambda_{дз}, \lambda_m, \lambda_f, \lambda_{ст}$ – коэффициенты теплопроводности, $\rho_{дз}, \rho_m, \rho_f, \rho_{ст}$ – плотности дымовых газов, обжигаемого материала, футеровки и стального корпуса печи соответственно; $T_{дзн}, T_{дзк}, T_{мн}, T_{мк}$ – температуры дымовых газов и обжигаемого материала в начале и конце их движения в печи.

Синтез структуры объекта управления. Исследуем динамику объекта в зоне малых отклонений $\Delta T_A, \Delta T_B, \Delta T_C$ от некоторого установившегося технологического режима печи под действием изменения управляющего воздействия ΔQ и возмущения Δw . Синтезирована структура объекта управления (рис. 4), где операторы A_1, A_2 и A_3 являются математическими моделями объекта по управлению, и на их выходе получают изменение температур материала в точках A, B и C – $\Delta T_A^y, \Delta T_B^y, \Delta T_C^y$. Блоки A_4, A_5 и A_6 – математические модели по отношению к возмущению, на их выходах получают изменение температур материала $\Delta T_A^e, \Delta T_B^e, \Delta T_C^e$ в тех же точках. В блоке A_7 вычисляем производную dT/dz . Для нахождения операторов воспользуемся программной средой SolidWorks, использующей метод конечных объемов [5].

Пример моделирования объекта управления. На примере вращающейся печи СМ875Б типоразмера $2,5 \times 40$ м, оборудованной газовой горелкой С 199-08-100 (с расходом газа до $800 \text{ м}^3/\text{час}$, тепловой мощностью до $9,3 \text{ МВт}$) и осуществляющей обжиг керамзита из глины Смышляевского месторождения (с влажностью $15 \dots 30\%$, насыпной плотностью после формовки 1100 кг/м^3 , теплоемкостью $0,92 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, теплопроводностью $2,56 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$), что соответствует режиму работы печи, рассмотренному в [2], найдем операторы структуры (рис. 4) в форме передаточных функций и определим их параметры. В программной среде SolidWorks создана трехмерная геометрическая модель вращающейся печи по рис. 2, затем эта модель была модифицирована под приложение Flow Simulation той же программной среды.

Были заданы: параметры газовой среды [3]; материалы (из библиотеки SolidWorks): *корпус вращающейся печи* – сталь, *футеровка* – кирпич огнеупорный. *Обжигаемый материал* создан в редакторе материалов с параметрами: плотность 1000 кг/м^3 , теплоемкость $880 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, теплопроводность $1.74 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, температура расплавления 1226.85 °C . Была задана на основании экспериментальных данных температура на границе корпуса печи и окружающей среды 300 °C .



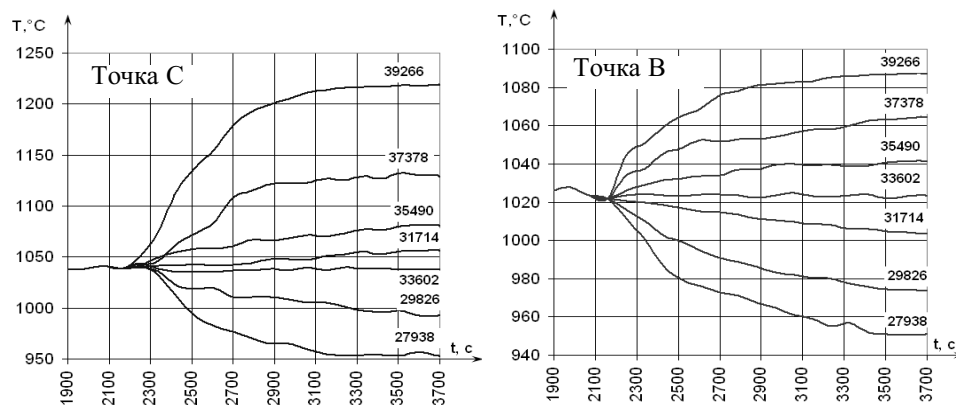
Р и с . 4. Структурная схема объекта управления

Задание начальных условий: дымовые газы – температура 20 °С, плотность 1 кг/м³, скорость 30 м/с; загружаемый материал – температура 30 °С, скорость движения 0,016 м/с; мощность объемного теплового источника 35202 Вт/м³. *Граничные условия* были выбраны программой автоматически, по известным критериям [4, 6], которые использовались при составлении системы (6).

Оценка адекватности построенной вычислительной модели. Было задано время расчета 86400 с (1 сут), что соответствует выводу печи на установившийся технологический режим. В результате получена расчетная кривая обжига керамзита. По результатам ее сравнения с известной экспериментальной кривой, приведенной в [2], была вычислена ошибка, которая не превысила 7% в интересующих нас зонах (зонах подготовки и вспучивания), что свидетельствует об адекватности модели в установившемся режиме.

Переходные процессы в объекте управления

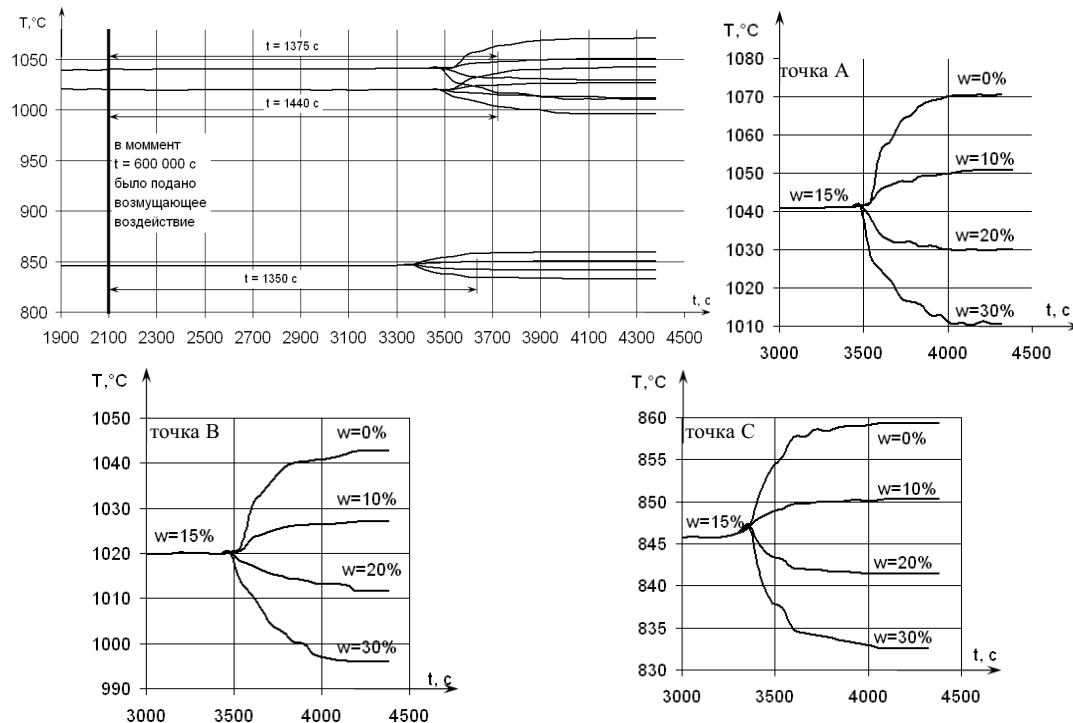
Переходные процессы в объекте управления по отношению к управляющему воздействию (рис. 5). Для исследования переходных процессов в объекте управления «в малом» по отношению к ступенчатому изменению управления был поставлен эксперимент по следующей методике. Наблюдения температуры материала проводились в точках $z_A = 35$ м, $z_B = 32$ м и $z_C = 30$ м. Выбор максимальной величины ступенчатого воздействия $\pm \Delta Q = 5\,664$ Вт/м³ от значения $Q_0 = 35\,202$ Вт/м³ произведен по условию максимальной температуры вспучивания $T_c = 1200$ °С. Этот диапазон разбит на 6 величин: три положительных значения ($\Delta Q = 1\,888$; 3 776; 5 664) и три отрицательных ($\Delta Q = -1\,888$; -3 776; -5 664). При исследовании динамики начальные условия для расчета принимались равными конечным условиям вывода печи на установившийся режим, т. е. моменту $\tau = 86400$ с, для исключения погрешностей на начальном участке расчета, связанных с использованием численных методов в SolidWorks; скачкообразные воздействия ΔQ прикладывались в момент времени $\tau = 2100$ с.



Р и с . 5. Переходные процессы по отношению к управляющему воздействию

Переходные процессы в объекте управления по отношению к возмущающему воздействию (рис. 6). Для исследования динамики объекта управления по возмущению эксперимент проводился следующим образом. Была задана начальная влажность подаваемого на обжиг в печь материала $w_0 = 15\%$. Было выбрано 4 значения $\Delta w = -5\%$; -15% ; 5% ; 15% . Постановка эксперимента проводилась аналогично тому,

как это выполнялось по отношению к управлению. Наблюдения температуры материала проводились в тех же сечениях печи.



Р и с . 6. Переходные процессы по отношению к возмущающему воздействию

Передаточные функции динамических моделей объекта управления

Точка	Передаточные функции	
	по управлению	по возмущению
С	$W_C^y(p) = \frac{\Delta T_C(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{K_C^y e^{-\tau_C^y p}}{T_C^y p + 1}$	$W_C^B(p) = \frac{\Delta T_C(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{K_C^B e^{-\tau_C^B p}}{T_C^B p + 1}$
В	$W_B^y(p) = \frac{\Delta T_B(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{K_B^y e^{-\tau_B^y p}}{T_B^y p + 1}$	$W_B^B(p) = \frac{\Delta T_B(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{K_B^B e^{-\tau_B^B p}}{T_B^B p + 1}$
А	$W_A^y(p) = \frac{\Delta T_A(p)}{\Delta Q(p)} = 0$	$W_A^B(p) = \frac{\Delta T_A(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{K_A^B e^{-\tau_A^B p}}{T_A^B p + 1}$

Анализ полученного множества переходных характеристик (см. рис. 5, 6) температуры материала в точках А, В и С позволил найти динамические модели объекта управления «в малом» по отношению к управлению и возмущению (см. таблицу) в виде типовых динамических звеньев, параметры которых зависят от величин этих воздействий.

Выводы

1. Разработана математическая модель вращающейся печи для производства керамзита как объекта управления с распределенными параметрами, создана в про-

граммной среде SolidWorks ее вычислительная модель. Показано, что модель адекватно описывает формирование установившегося температурного режима печи.

2. Применительно к решению задачи автоматизации процесса вспучивания керамзита синтезирована структура печи в виде многомерной модели с сосредоточенными параметрами, где в качестве выходных координат рассматривается температура печи в трех характерных точках А, В и С, что позволяет установить два основных параметра печи, определяющих плотность керамзита, температуру вспучивания T_c и градиент dT/dz в конце зоны нагрева.

3. Показано, что параметры звеньев многомерной структуры (время запаздывания, постоянные времени и коэффициенты передачи) зависят от величины управляющих и возмущающих воздействий и являются функциями физических свойств обрабатываемого материала, изменяющихся в процессе перемещения от входа к выходу под влиянием температурных воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с., ил.
2. Онацкий С.П. Производство керамзита. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1987. – 333 с.
3. Галицкий С.Я., Фадеев А.С. Математическое описание сжигания газа во вращающейся печи для обжига керамзита // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы 64-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР университета за 2006 г. – Самара, 2007. – 564 с.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1966. – 560 с.
5. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб, 2008. – 1040 с.
6. Михеев М.А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотипное. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

Статья поступила в редакцию 1 июня 2011 г.

UDC 62.524

MODELING OF HAYDITE SWELLING IN ROTATING FURNACE AS AN CONTROL OBJECT

S. Galickov¹, A. Danilushkin², A. Fadeev¹

¹ Samara State Architectural-Building University
194, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443001

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The paper refers to the design of haydite production rotating furnace in the form of layer cylinder as a control object with distributed parameters. Differential equations in cylindrical coordinates for heat conductivity were used. As an example the furnace SM875B of a standard size 2,5×40m was used for control object for solving the problem of automation of haydite swelling process relative to control input and interference in the form of lumped parameters structure/

Keywords: *the rotating furnace, expanded clay, a control object, heat transfer, object with distributed parameters, motion equations, control object approximation, adequacy, mathematical modeling.*

S.Ya. Galickov – Doctor of Technical Sciences, Professor.

A.I. Danilushkin – Doctor of Technical Sciences, Professor.

A.S. Fadeev – Postgraduate student.